

# РАЗРАБОТКА НЕПРЕРЫВНОГО СПОСОБА ДЕФОРМАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

## DEVELOPMENT OF CONTINUOUS DEFORMATION METHOD IN MANUFACTURE OF THE HIGH-STRENGTH STEEL WIRE WITH ULTRAFINE-GRAINED STRUCTURE

М.В. Чукин, Д.Г. Емалеева  
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»,  
Россия, m.chukin@mail.ru

It is developed the continuous deformation method of equal channel angular drawing for formation of ultrafine-grained structure and control of mechanical properties in bulk materials. Principles of continuous technology engineering for high-strength steel wire production are discussed. It is shown the possibility of practical implementation of the method by means of multiple drawing machines.

Необходимость достижения высокого качества, эксплуатационной надежности и устойчивого уровня рыночной конкурентоспособности продукции метизной отрасли требует повышения уровня прочностных и пластических свойств стальной проволоки. В связи с этим при разработке технологических процессов производства стальной проволоки целесообразно реализовывать следующие основные механизмы упрочнения:

- деформационный (дислокационный) механизм упрочнения, возникающий в результате увеличения плотности дислокаций и их взаимодействия;
- твердорастворный механизм упрочнения, при котором упрочнение является следствием взаимодействия дислокаций и атомов легирующих элементов;
- зернограницный механизм упрочнения, возникающий в результате изменения величины зерна;
- дисперсионный механизм упрочнения, связанный с торможением движения дислокаций дисперсными частицами.

Указанные механизмы широко реализуются в технологиях производства проволоки. Однако резерв улучшения комплекса потребительских свойств проволоки в рамках существующих технологий при обеспечении необходимой экономической эффективности в настоящее время во многом исчерпан. Традиционные способы обработки проволоки методом волочения сопровождаются быстрым исчерпанием ресурса пластичности материала, специальные виды термической обработки требуют применения высокоуглеродистых сталей, больших производственных площадей и сложного в обслуживании оборудования, но не обеспечивают поточности процессов производства проволоки; легирование эффективно с точки зрения возможности повышения прочностных и управления специальными свойствами стали, однако требует применения дорогостоящих химических элементов.

Такое положение делает актуальным поиск инновационных технологических решений, обеспечивающих повышение механических свойств проволоки и не связанных с изменением исходного

химического состава или применением дополнительных операций термической обработки.

В последние годы наметились новые пути повышения свойств конструкционных материалов за счет целенаправленного формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры металлов и сплавов в процессе деформационного наноструктурирования. В связи с высокой эффективностью процессы деформационного наноструктурирования являются предметом многочисленных исследований российских и зарубежных авторов. Однако большинство из них отличается низкой технологичностью и невозможностью интеграции в производственные линии метизных предприятий, что обусловлено сложностью формирования однородной УМЗ структуры заготовок с заданными формой и геометрическими размерами, конструктивными особенностями, уровнем автоматизации и производительностью используемого оборудования, а также температурно-скоростными условиями обработки.

С целью развития существующих способов деформационного наноструктурирования коллективом специалистов ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» разработан принципиально новый непрерывный способ равноканальной угловой свободной протяжки (РКУ протяжки) проволоки (Патент РФ на изобретение № 2446027) [1]. Сущность способа заключается в многократном протягивании проволоки через сборную волоку специального профиля, что вызывает одноосное растяжение и изгиб проволоки одновременно в двух очагах деформации. Это обеспечивает немонокотную деформацию и способствует значительной фрагментации структурных составляющих материала.

Деформация проводится при комнатной температуре. Принципиальное отличие РКУ протяжки от большинства известных способов деформационного наноструктурирования заключается в возможности использования процесса в условиях поточного производства на действующем оборудовании метизной отрасли.

С целью обеспечения высокой эффективности и технологической стабильности РКУ протяжка реализуется при неполном заполнении инст-

румента проволокой, которая в процессе обработки сохраняет неизменной площадь поперечного сечения  $F$  и последовательно проходит следующие основные области (см. рисунок 1):

- зона свободного входа проволоки в инструмент (область I);
- зона упруго-пластического контакта и изгиба проволоки в области пересечения каналов инструмента (область II);
- межочаговая область (область III);
- зона упруго-пластического контакта и изгиба проволоки в области выхода из инструмента (область IV);
- зона свободного выхода проволоки из инструмента (область V).

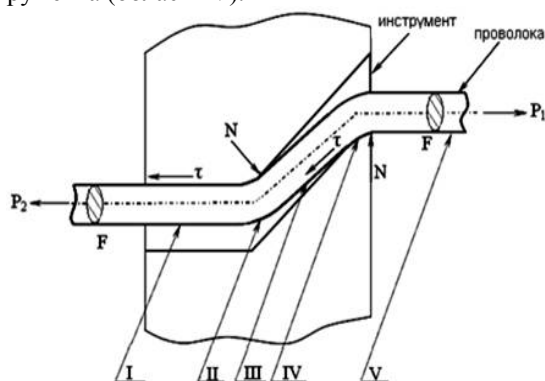
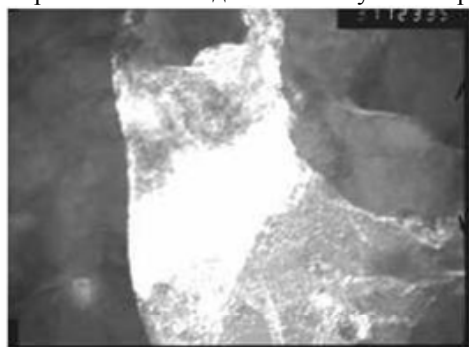


Рис. 1. Принципиальная схема процесса РКУ протяжки:  $P_1$  - усилие протяжки;  $P_2$  - усилие противонапряжения;  $N$  - сила нормального давления;  $\tau$  - сила трения;  $F$  — площадь поперечного сечения проволоки

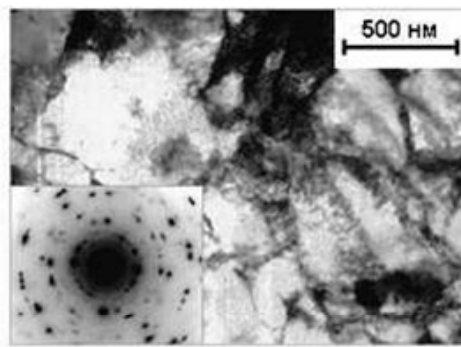
Как следует из представленной на рисунке 1 схемы, усилие протяжки  $P_1$ , приложенное к переднему концу проволоки, протягивает ее через 2 пересекающихся канала, обеспечивая одновременный изгиб и одноосное растяжение проволоки. В процессе обработки может действовать усилие про-

тивонапряжения  $P_2$ . Вследствие движения проволоки относительно неподвижной конструкции в области упруго-пластического контакта инструмента с проволокой возникают силы нормального давления  $N$  и силы трения  $\tau$ , направленные по касательной к поверхности контакта. Таким образом, сдвиговая деформация, возникающая одновременно в двух очагах деформации, может инициировать существенную фрагментацию структурных составляющих материала.

В подтверждение вышесказанного экспериментальные исследования влияния процесса РКУ протяжки на структуру и свойства отожженной проволоки из стали марки 10 диаметром от 4,2 до 5,5 мм показали следующие основные результаты. В ходе дифракционного электронно-микроскопического анализа структуры образцов в условиях Института физики металлов УрО РАН, было установлено, что уже после двух и вплоть до десяти циклов РКУ протяжки наблюдается интенсивное диспергирование структурных составляющих в поперечном сечении независимо от диаметра образцов. Наиболее значительные изменения происходят в поверхностных слоях проволоки. При этом процесс фрагментации поверхности носит кумулятивный характер, т.е. толщина измельченного слоя от прохода к проходу непрерывно возрастает и после 10 циклов обработки достигает значения 280 мкм. В центре проволоки наблюдались фрагментированные зерна феррита (размер фрагментов 300 – 360 нм), т. е. происходили образование субграниц и разориентация микрообъемов в пределах одного зерна (рисунок 2, а). Вместе с тем были выделены области с множеством ультрамелких произвольно ориентированных зерен феррита. Электронограммы аналогичных участков представляли собой множество рефлексов, расположенных по концентрическим окружностям (рисунок 2, б).



а



б

Рис. 2. Типы микроструктур, формирующихся в процессе РКУ протяжки в центральной области проволоки из стали марки 10:

- а — фрагментированные зерна феррита (темнопольное изображение),  $\times 37000$ ;
- б — УМЗ структура (светлопольное изображение и электронограмма)

Границы сформированных зерен неравновесные, изогнутые и имеют сложную дислокационную структуру (рисунок 3). По данным работы [2], образование такого вида границ, легко поддающихся сдвигу, может инициировать возникновение

специфичного механизма пластической деформации (зернограницное проскальзывание) и, как следствие, улучшение пластических свойств материала.

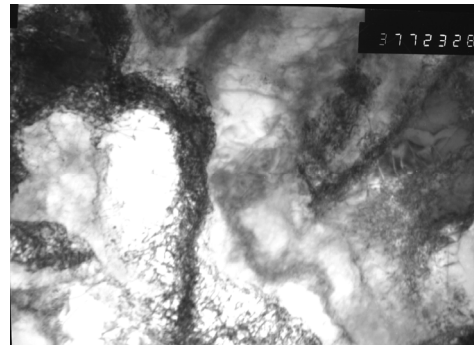
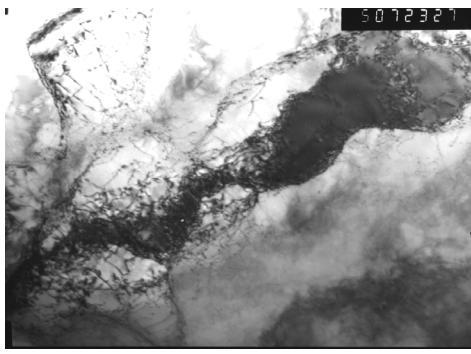


Рис. 3. Образование волнообразных и изогнутых границ зерен в процессе РКУ протяжки образцов из стали марки 10, х 37000

Исследование распределения микротвердости по сечению образцов подтвердило выявленную неоднородность структуры в поперечном сечении проволоки и закономерность преимущественного упрочнения ее поверхности. Максимальный прирост микротвердости поверхности относительно центральной области превышал 1000 Н/мм<sup>2</sup> (для образца диаметром 5,0 мм, подвергнутого РКУ протяжке за 10 проходов).

Результаты пластометрических исследований образцов после десятикратной РКУ протяжки показали, что формирование УМЗ структуры обеспечило увеличение сопротивления материала деформации до 35 % по сравнению с исходным состоянием. Кроме того, было установлено, что при неизменности исходной площади поперечного сечения пластические свойства проволоки из стали с УМЗ структурой сохраняются. Это позволяет подвергать материал дальнейшей обработке волочением с необходимой суммарной деформацией на требуемый размер.

С учетом физической сущности и технологических особенностей процесса РКУ протяжки рекомендованы следующие основные принципы проектирования непрерывных технологий производства стальной проволоки с уникальным ком-

плексом высоких механических свойств [3].

1. Принцип критериальной оценки возможности получения ультрамелкозернистой структуры в процессе РКУ протяжки.

Исходя из предназначения и физической сущности РКУ протяжки, предполагающей одно-временный знакопеременный изгиб и одноосное растяжение при неизменности геометрических размеров заготовки, разработан комплекс критериев оценки возможности получения УМЗ структуры, которые можно разделить на две группы.

1.1. Критерии, обеспечивающие достижение необходимой степени и однородности НДС материала обрабатываемой проволоки.

1.1.1. Выполнение условия пластичности Губера-Мизеса:

$$\sigma_u = \sigma_T, \quad (1)$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести проволоки, МПа;  $\sigma_u$  - интенсивность напряжений, МПа.

Интенсивность напряжений  $\sigma_u$  определяется по известной формуле:

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{ij}$  - компоненты тензора деформаций.

В соответствии с данным критерием режимы РКУ протяжки в каждом проходе должны обеспечивать пластическое течение, обусловленное достижением интенсивности напряжений, возникающих при прохождении проволоки через инструмент, предела текучести обрабатываемого материала.

1.1.2. Обеспечение максимальной равномерности распределения интенсивности напряжений по сечению проволоки:

$$\Delta = (\sigma_u^{нов} - \sigma_u^{центр}) \rightarrow MIN \text{ при } \sigma_u^{нов} \rightarrow MAX, \quad (3)$$

где  $\Delta$  - градиент интенсивности напряжений, МПа;  $\sigma_u^{нов}$ ,  $\sigma_u^{центр}$  - интенсивность напряжений на поверхности и в центре проволоки, соот-

ветственно, МПа.

Выполнение критерия обеспечивает однородность формируемой УМЗ структуры и свойств по сечению заготовки.

1.1.3. Стремление уровня значений интенсивности деформаций сдвига  $\Gamma$  по сечению проволоки к максимальной величине:

$$\Gamma \rightarrow MAX, \quad (4)$$

где

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)};$$

$\varepsilon_{ij}$  - компоненты тензора деформаций.

Выполнение критерия обеспечивает высокий уровень деформаций сдвига, обуславливающих формирование УМЗ структуры проволоки в процессе РКУ протяжки.

1.2. Критерий, обеспечивающий технологическую стабильность РКУ протяжки. Физический смысл критерия заключается в недопустимости превышения значений интенсивности напряжений, возникающих в переднем конце проволоки под действием усилия протяжки, величины временного сопротивления материала. Нарушение условия приведет к обрыву переднего конца проволоки. В качестве такого критерия можно использовать коэффициент запаса прочности материала проволоки  $K_3$ :

$$K_3 \leq \frac{\sigma_v}{\sigma_u}, \quad (5)$$

где  $\sigma_v$  – временное сопротивление заготовки, МПа.

Положительные результаты критериальной оценки результативности процесса РКУ протяжки позволяют рекомендовать к апробации выбранные технологические параметры обработки.

2. Принцип определения конструктивных особенностей инструмента деформационной обработки способом РКУ протяжки (рисунок 4).

Основными конструктивными параметрами инструмента, влияющими на эффективность обработки проволоки, являются:

- диаметр горизонтального (входного) канала инструмента  $D_1$ ;
- диаметр наклонного (выходного) канала инструмента  $D_2$ ;
- угол наклона оси выходного канала инструмента к горизонтальной плоскости  $\alpha$ , град (или угол пересечения каналов инструмента  $\Phi = (180^\circ - \alpha)$ );
- толщина пластин, образующих горизонтальный ( $L_{вх}$ ) и наклонный ( $L_{вых}$ ) каналы;
- радиусы скруглений кромок каналов  $r$ .

Другие параметры инструмента подбираются в зависимости от конструктивных особенностей оборудования, в составе которого используется инструмент.

При определении соотношения исходного диаметра заготовки и диаметра горизонтального канала инструмента  $D_1$  необходимо учитывать, что увеличение степени заполнения каналов инструмента положительно влияет на интенсивность упрочнения стали в процессе обработки. Максимально возможный диаметр обрабатываемой заготовки определяется технологической стабильностью процесса РКУ протяжки.

3. Принцип определения количества циклов РКУ протяжки, обеспечивающих достижение требуемого уровня прочностных и пластических свойств проволоки. При определении количества циклов РКУ протяжки заготовки необходимо учитывать следующие основные особенности:

- для повышения эффективности процесса РКУ протяжки рекомендуется многократная обработка с поворотом заготовки вокруг своей продольной оси на угол  $90^\circ$  при каждом последующем проходе. Это возможно при изменении в каждом последующем проходе направления изгиба заго-

товки путем поворота наклонного канала инструмента.

- минимальное количество циклов, обеспечивающее равномерность «проработки» по всему объему проволоки и, как следствие, однородность структуры и свойств материала, должно быть не менее четырех. В зависимости от требуемого уровня механических свойств готового изделия, экономической целесообразности проведения обработки и возможностей технологического оборудования, в составе которого используется инструмент, количество циклов РКУ протяжки может быть увеличено.

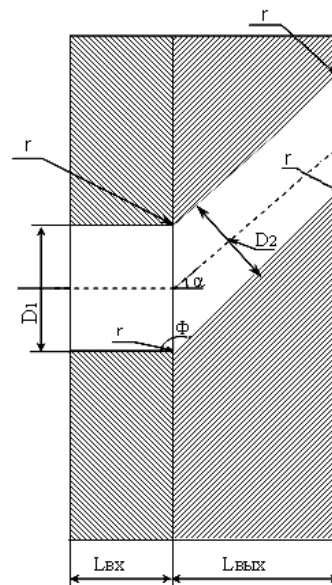


Рис. 4. Принципиальная схема инструмента деформационного наноструктурирования проволоки способом РКУ протяжки

Наиболее перспективными вариантами использования РКУ протяжки является ее совмещение в различных сочетаниях с традиционными процессами волочения при изготовлении проволоки из низко- или среднеуглеродистых сталей. При этом состав и режимы операций производства проволоки не требуют существенных корректировок. Практическая реализация процесса РКУ протяжки достигается установкой на многократном волочильном стане необходимого количества комплектов технологического инструмента разработанной конструкции. При таком подходе технологическая схема производства проволоки, включающая обработку исходной заготовки или передельной проволоки способом РКУ протяжки и волочение на необходимый диаметр, обладает высокой степенью технологической развязки, внутренней гибкостью с большим количеством траекторий обработки, мобильностью при смене сортамента, а также возможностью изготовления партий готовой проволоки любой тоннажности.

С целью формирования УМЗ структуры обработке способом РКУ протяжке целесообразно подвергать исходную заготовку, передельную заготовку или готовую проволоку диаметром от 0,5 до 5,5 мм. Ниже приведены возможные варианты технологической компоновки процесса четырех-

кратной РКУ протяжки и волочения применительно к современному оборудованию проволочного производства.

Вариант 1. Использование РКУ протяжки на многократных волочильных станах магазинного типа. С целью формирования УМЗ структуры и повышения комплекса механических свойств проволоки диаметром 0,5...6,0 мм из заготовки диаметром до 8,0 мм необходимое количество ком-

плектов технологического инструмента разработанной конструкции может быть установлено в начале, середине или на завершающих этапах маршрута обработки передельной заготовки или готовой проволоки. В качестве примера на рисунке 5 продемонстрирована возможность реализации процесса РКУ протяжки на завершающих этапах маршрута обработки.

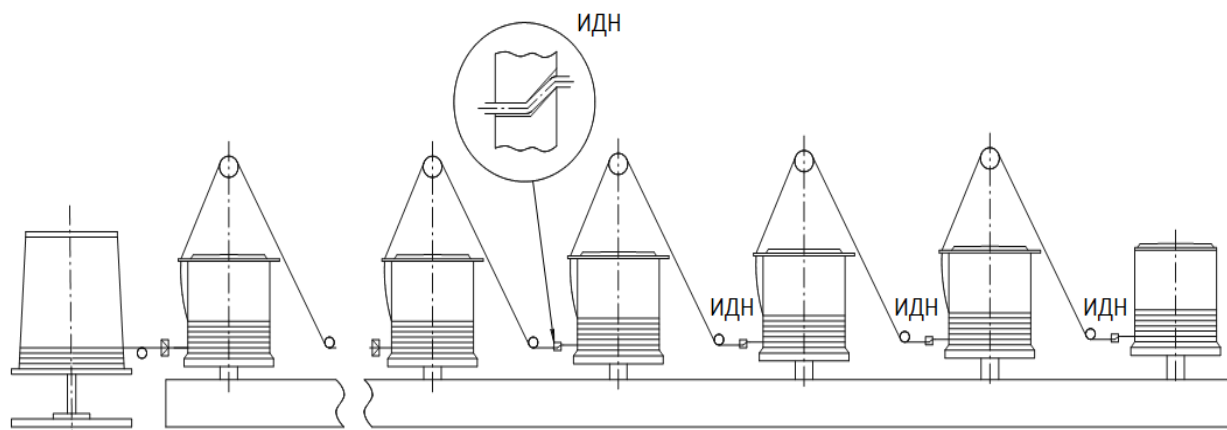


Рис. 5. Реализация процесса РКУ протяжки с применением многократных волочильных станков магазинного типа (ИДН - инструмент деформационного наноструктурирования проволоки)

Представленная на рисунке 5 схема может быть реализована на многократных волочильных станах магазинного типа модели 6/450(350), 8/250 (АЗТМ) или UDZSA 1250, UDZSA 630 (СКЕТ, Германия).

Вариант 2. Использование РКУ протяжки на многократных станах мокрого волочения. Станы мокрого волочения могут быть использованы для получения проволоки со скоростью до 25 м/с. В настоящее время находят применение волочильные машины со скольжением, на которых одновременно протягивается от 2 до 12 ниток. В качестве при-

мера на рисунке 6 продемонстрирована возможность реализации процесса РКУ протяжки исходной заготовки диаметром не менее 0,5 мм на многократном стане мокрого волочения. Выбор конструкции волочильной машины определяется следующими основными факторами: диаметр готовой проволоки, кратность волочения проволоки, условия охлаждения проволоки, условия смазки, регламентируемый уровень механических свойств готовой проволоки.

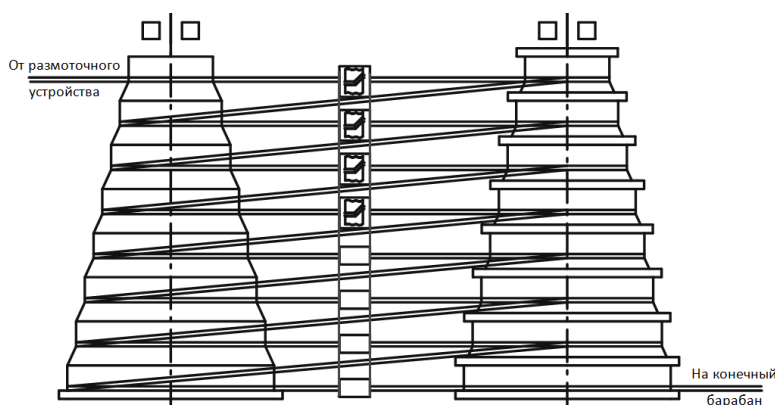


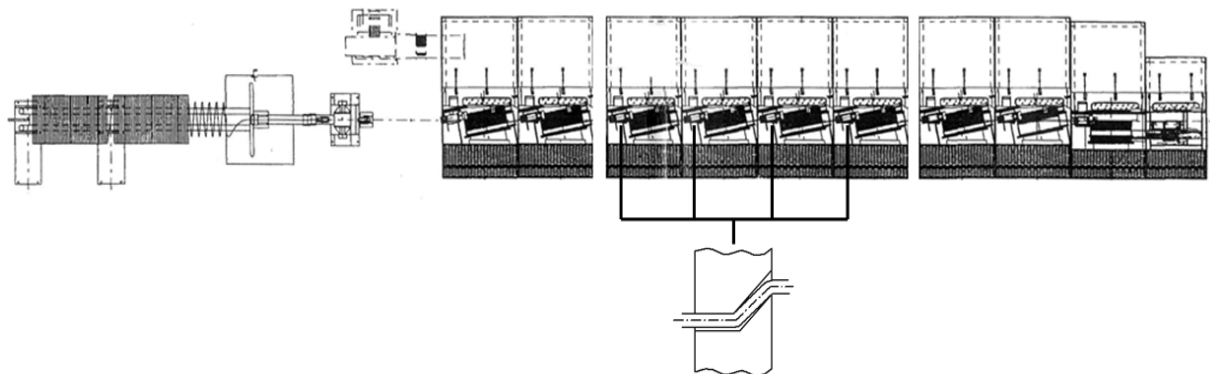
Рисунок 6 - Реализация процесса РКУ протяжки на многократном стане мокрого волочения

Вариант 3. Использование РКУ протяжки на многократных волочильных станах прямоточного типа. Многократные волочильные станы прямоточного типа - представляют прогрессивный вид оборудования предприятий метизной отрасли, отличающийся следующими основными преимуще-

ствами: высокая производительность, возможность обрабатывать проволоку диаметром от 5,0 до 1,0 мм с высокой кратностью волочения, применение регулируемого противонатяжения, обеспечивающего снижение удельного давления, повышение стойкости волок и снижение температуры очага

деформации, исключение скручивания и перегибов проволоки при передаче с барабана на барабан, что облегчает заправку машины и позволяет волочить проволоку из высокопрочной стали.

В качестве примера на рисунке 7 продемонстрирована возможность реализации процесса РКУ протяжки на данном волочильном стане в середине маршрута обработки проволоки.



Рисунке 7 - Реализация процесса РКУ протяжки на многократном волочильном стане прямоточного типа

Рассматриваемый способ соответствует перспективным направлениям развития способов

деформационного наноструктурирования объемных материалов (рисунок 8).



Рисунок 8 - Перспективные направления развития способов деформационного наноструктурирования объемных материалов

Дальнейшее развитие способа РКУ протяжки требует проведения комплекса теоретико-экспериментальных исследований, направленных на улучшение однородности структуры и свойств обрабатываемой проволоки, обоснованный выбор числа циклов обработки, смазочных материалов, а также на определение наиболее рационального соотношения геометрических параметров инструмента.

Внедрение предлагаемого способа в промышленность открывает перспективы создания новых наукоемких технологий производства высокопрочной стальной проволоки ответственного назначения, исключающих необходимость применения дорогостоящих сырья и дополнительных операций термической обработки.

## Библиографический список

1. Непрерывный деформационный способ формирования ультрамелкозернистой структуры стальной проволоки / Корчунов А.Г., Чукин М.В., Емалеева Д.Г. и др. // Сталь. №6. 2010. С. 96-98.
2. Валиев Р.З., Мурашкин М.Ю., Рааб Г.И. Новые тенденции в разработке объемных наноструктурных материалов с уникальными свойствами // Фазовые и структурные превращения в сталях : сб. науч. тр., вып. 5 ; под ред. В.Н. Урцева — Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 2008. С. 198 – 226.
3. Принципы проектирования непрерывного способа получения стальной проволоки с ультрамелкозернистой структурой / Корчунов А.Г., Чукин М.В., Полякова М.А., Емалеева Д.Г. и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. № 1 (33). С. 43-46.